

光配向処理を用いた表面安定化強誘電性液晶の限界解像度

藤掛 英夫*・舟守 淳**・會田 田人*・菊池 宏*・藤井 孝憲*
河北 真宏*・滝沢 國治*・岸 清**

*NHK 放送技術研究所 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

**東京理科大学理学部 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3

Limiting Resolution of Surface-Stabilized Ferroelectric Liquid Crystal with Optical Alignment Process

Hideo FUJIKAKE,* Jun FUNAMORI,** Tahito AIDA,* Hiroshi KIKUCHI,* Takanori FUJII,* Masahiro KAWAKITA,* Kuniharu TAKIZAWA* and Kiyoshi KISHI**

*NHK Science & Technical Research Laboratories, 1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510

**Department of Applied Physics, Science University of Tokyo, 1-3, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601

In order to improve microscopic-area spatial light modulation properties of the surface-stabilized ferroelectric liquid crystal cell, the optical alignment process has been investigated using polarized deep ultraviolet excimer light with short wavelength. When driving the fabricated cell with a finely-patterned transparent electrode, the spatial dispersion of threshold voltage for bistable switching became small without microscopic alignment defects, and the high limiting resolution of over 400 line pairs/mm was achieved. By simulating the applied electric field in the liquid crystal cell, it was confirmed that a small cell gap, a sharp threshold electrooptic property and spatial uniformity of the threshold voltage are essential for high-resolution spatial modulation. Our ferroelectric liquid crystal cell is applicable to an electrooptic layer with extremely high resolution of wavelength order, for realizing dynamic holographic display and high-density optical parallel data processing in future.

1. はじめに

近年、大容量表示が可能な平面ディスプレイとして、液晶ディスプレイが急速に普及しており、情報化社会の進展に大きな役割を果たしている。さらに将来の動画ホログラム¹⁾や高密度並列光情報処理の実現に向けては、液晶を用いた光書き込み空間光変調素子など、波長オーダーの高解像度を有する光デバイスが待望されている^{2,3)}。そこに使われる液晶としては、強誘電性液晶⁴⁾を微小ギャップに封じた表面安定化強誘電性液晶セル⁵⁾ (SSFLC; surface-stabilized ferroelectric liquid crystal) が有望である。

SSFLC は、数十 μs の高速スイッチング動作やメモリー機能といった際だった利点も兼ね備えるため、現在、高精度なフラットディスプレイに実用化されているが、その独特の配向構造から表示欠陥⁶⁾が生じやすい。これまで、配

向膜における摩擦(ラビング)処理の工夫⁷⁾や高分子表面の平坦性向上⁸⁾などにより、表示欠陥の解消が図られているが、直視型ディスプレイより2桁も小さな μm オーダーで液晶を駆動し、ホログラム用素子を実現するには、配向欠陥の解消はもとより、微小領域の表示特性を損なう不規則なスイッチングドメインの発生を改善しなければならぬ。

本論文では、偏光した短波長紫外光の照射に伴う非接触配向処理により^{9,10)}、SSFLC 面内の閾値電圧を均一化し、空間動作特性の改善を図る。さらに、微細電極パターンを用いて液晶セルを駆動することにより、限界解像度を評価するとともに、SSFLC セル内の電界解析により、液晶を微細駆動するための条件を探る。

2. 配向欠陥

Fig. 1 に示すように、透明電極 (ITO; $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$) 付きガ

E-mail: fujikake@strl.nhk.or.jp

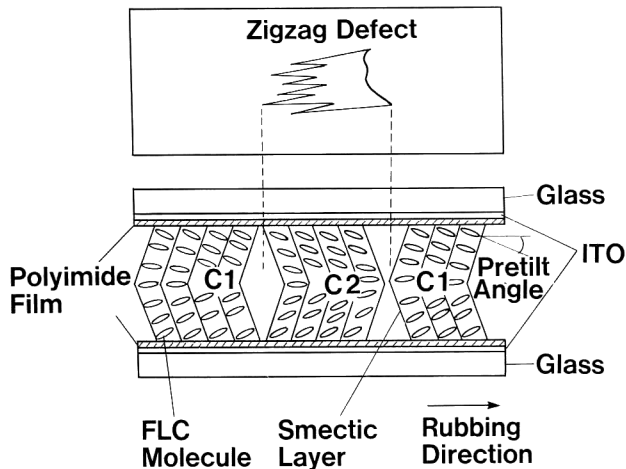


Fig. 1. Chevron model of a smectic layer structure in an SSFLC cell.

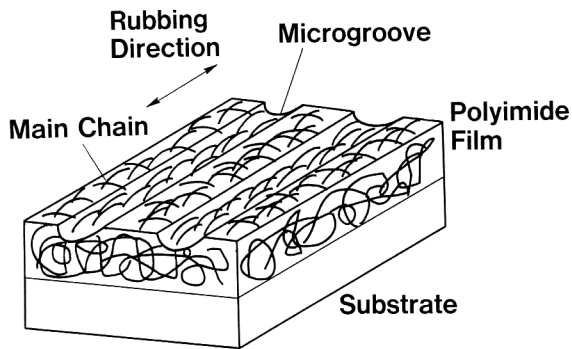


Fig. 2. Microgroove model of a rubbed polyimide film.

ラス基板で薄く挟まれた SSFLC セルでは、強誘電性液晶のスメクティック層が屈曲したシェvron配向構造⁶⁾が生じ、その屈曲方向が面内で頻繁に変化するため、ジグザグ状の表示欠陥が現れる。その屈曲方向が入れ替わる詳細なメカニズムは、これまでに明らかにされていない。筆者らは屈曲方向の不連続化が、配向処理の均一性に密接に関連すると考えた。

従来のラビング配向処理では、回転するロールのレーヨン繊維が高分子配向膜（ポリイミド樹脂）を機械的に摩擦するため、Fig. 2 に示すようなマイクログループが配向膜表面に生じる。それらは原子間力顕微鏡により確認されている¹¹⁾。マイクログループの内壁では、配向膜高分子が摩擦により延伸するため、細長い液晶分子が補足される。その結果として配向効果が生じるが、それは同時に補足力（アンカリング強度）や、液晶分子と配向膜の接触角（プレチルト角）に、空間的な著しい不均一性¹²⁾を与える。実際にラビング配向膜を用いたネマティック液晶セル（ホモジニアス配向、3 μm 厚）を偏光顕微鏡で観察した結果が Fig. 3 であり、ラビングの配向効果に少なからず不均性が生じて

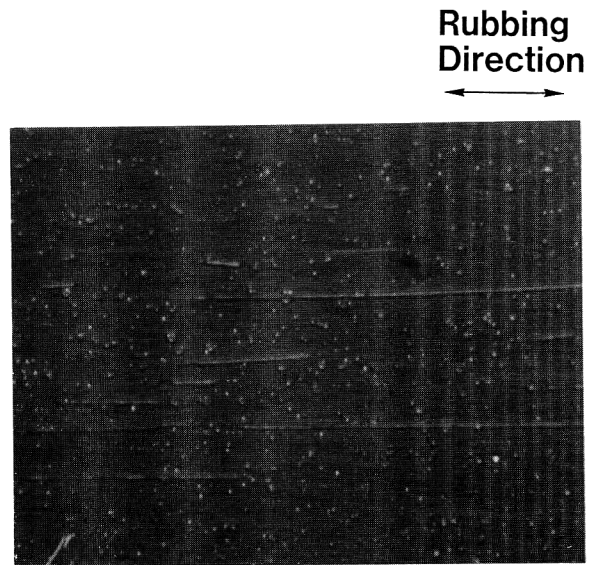


Fig. 3. Microscope photograph of the nematic liquid crystal cell using rubbed polyimide films.

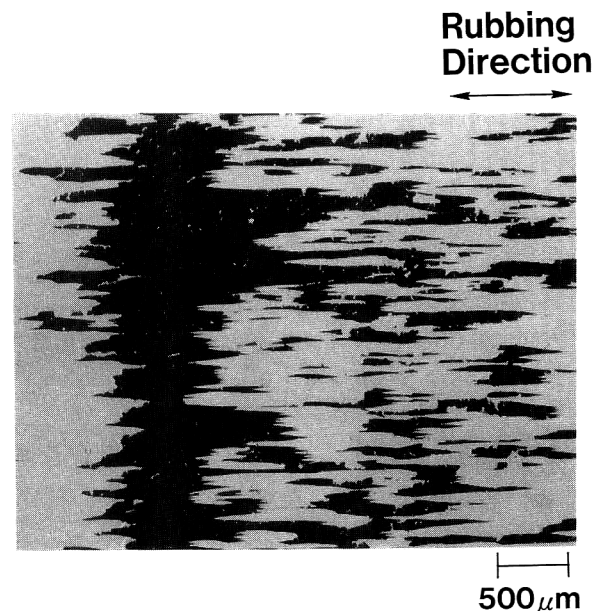


Fig. 4. Microscope photograph of zigzag defects of the SSFLC cell using rubbed polyimide films.

いることが確認できる。

このような配向の不均一性は、スメクティック A 相からカイラルスメクティック C 相（強誘電相）への相転移を伴う試作過程で、スメクティック層の屈曲を不連続化する 1 つの要因になりかねない。すなわち、SSFLC セルのモノドメイン化の冷却過程で、屈曲を有するカイラルスメクティック C 相のドメインが拡大・成長する際、配向膜の表面形態（マイクログループや高分子のミクロな凹凸⁸⁾）や主鎖配向の不均一性などの影響を受けて、屈曲方向の反転が促進

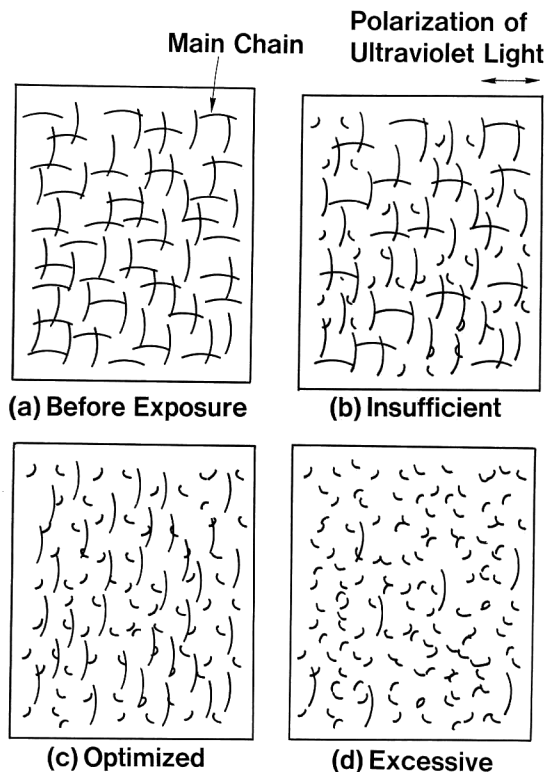


Fig. 5. Optical alignment process of the polyimide film surface with polarized ultraviolet light irradiation.

される可能性が高い。

今回、ラビング処理で試作した SSFLC セルでは、スメクティック層が約 19° 傾斜し、Fig. 4 に示されるようにラビング方向に伸びたストライプ欠陥や、ロールの摩擦むらに則した欠陥パターンが数多く出現した。

3. 光配向処理

3.1 配向膜

このように不均一なラビング処理に対して、近年、新たな配向手段として、偏光紫外光を用いた光配向法が見いだされている。光配向処理は非接触工程のため、空間的に均一なアンカリングが期待できる。光配向法には、光分解¹³⁾と光架橋¹⁴⁾を用いる 2 方式があり、これまで光架橋法を用いて SSFLC セルの均一化¹⁴⁾が試みられている。ここでは、配向膜材料の選択の自由度・汎用性にすぐれた光分解法を採用し、ラビング処理と同一の配向膜材料を用いることで、強誘電性液晶に対する配向効果を比較・検証できるようにした。光分解法では、Fig. 5 に示すように紫外光の偏光方向と同方向の配向膜主鎖が選択的に光分解され、残った直角方向の主鎖により、液晶分子が捕捉される。

なお、Fig. 1 のラビング処理に伴うシェブロン構造では、スメクティック層の屈曲方向と配向膜のプレチルト方向の

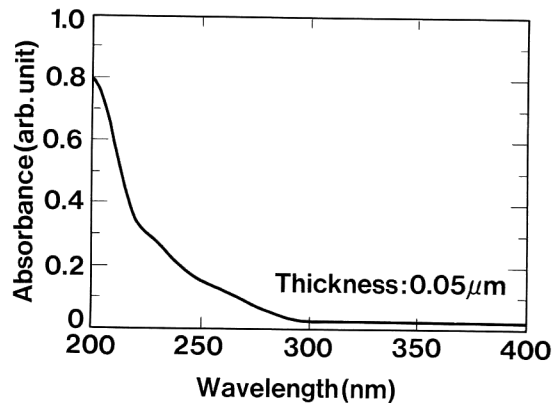


Fig. 6. Absorption spectrum of the polyimide film used in fabricating the SSFLC cells.

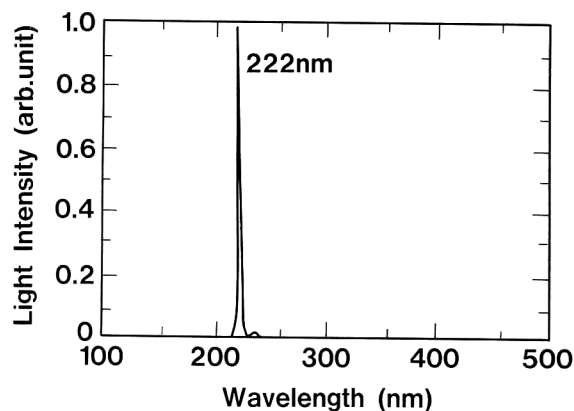


Fig. 7. Emission spectrum of the eximer lamp used for the optical alignment process.

違いから、C1, C2 配向と呼ばれる 2 つの配向構造が識別されるが、本方式では紫外光の垂直照射によりプレチルト角がゼロとなるため、そのような構造の差異は生じない。

3.2 紫外光照射

配向膜として用いた 50 nm 厚のポリイミド膜 (日本合成ゴム社 AL-1254) は、300 nm 以下の真空紫外域の中でも、Fig. 6 に示すように短波長光を強く吸収する。この吸収が光分解に直接寄与するため、より短波長の真空紫外光が効果的と考えられる。

そこで本実験では、Fig. 7 に示すように単一・短波長の真空紫外光を効率よく放出するエキシマランプ (ウシオ電機社 UER20H, 光強度 20 mW/cm^2) を、光配向法に初めて導入した。エキシマランプでは、石英ガラス管内の充填ガスに誘電体バリアー放電が生じるため、高エネルギーのエキシマ状態 (KrCl^*) が励起され、短波長の紫外光 (波長 222 nm) が放出される。エキシマランプからの紫外光は、Fig. 8 に示されるように、紫外光吸収の少ないカルサイト (CaCO_3) で構成されたグランティレイラ偏光プリズム (メレ

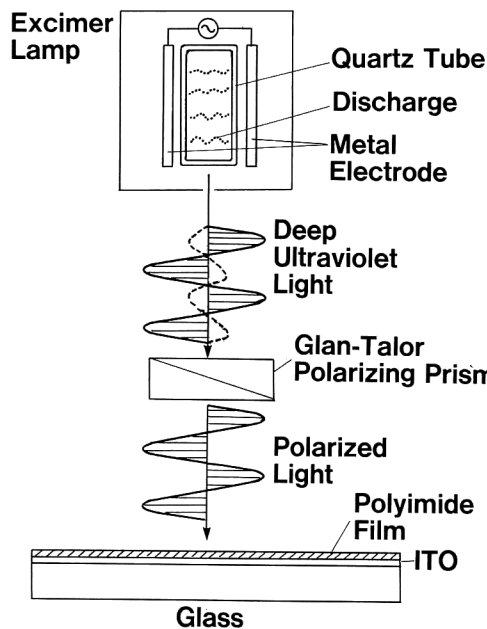


Fig. 8. Alignment process of the polyimide film using the deep ultraviolet light from the excimer lamp.

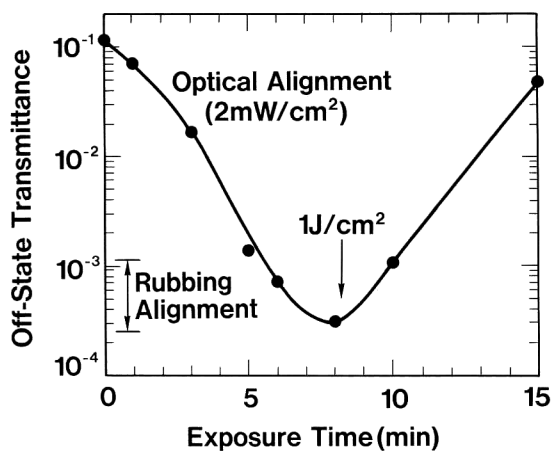


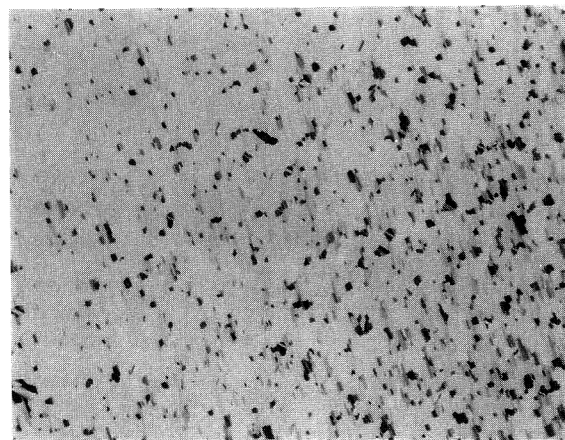
Fig. 9. Dependence of off-state transmittance of the SSFLC cell on the exposure time of ultraviolet light.

スグリオ社 03PTA-105) で直線偏光にされ、180°C で焼成したポリイミド膜に照射された。

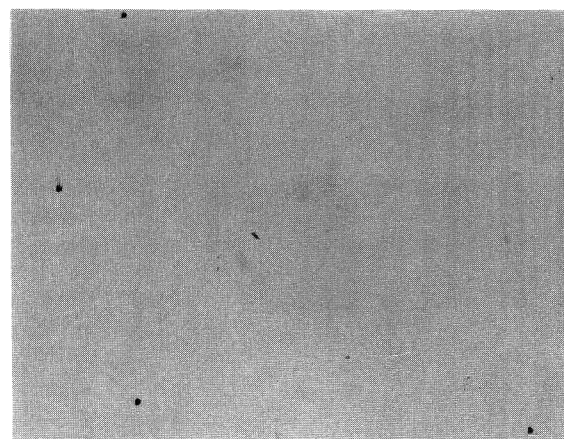
このように光処理された配向膜付き基板を用いて、2~3 μm のギャップを形成した。その中に強誘電性液晶材料(チソ社 CS-1014) を 100°C 以上で加熱・注入した後、徐冷 (0.5°C/分) により室温に戻して、強誘電性液晶をモノドメイン化した。

4. 液晶の配向性

SSFLC セルの配向状態を評価する目安として、クロスニコルの偏光板で挟んだときの透過率を測定した。直流電圧の印加により液晶分子を一方の配向状態に固定し、それ



(a) Exposure Time : 3min



(b) 7 min

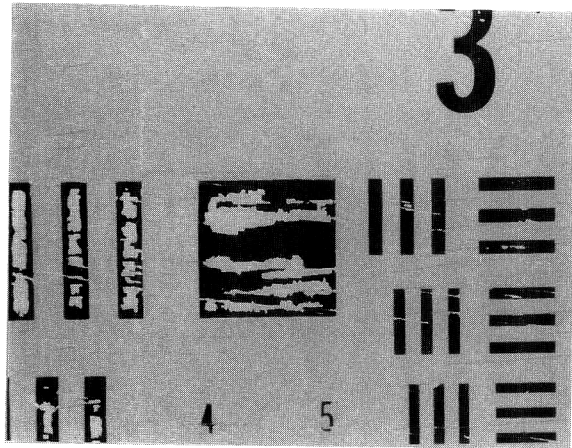


(c) 10 min

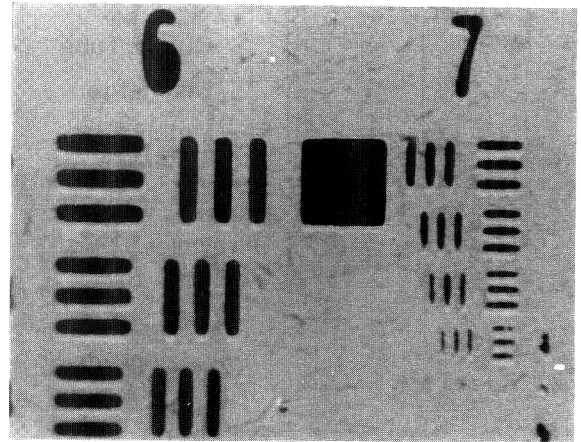
200 μm

Fig. 10. Microscope photographs of SSFLC cell using the polyimide alignment films for different exposure time.

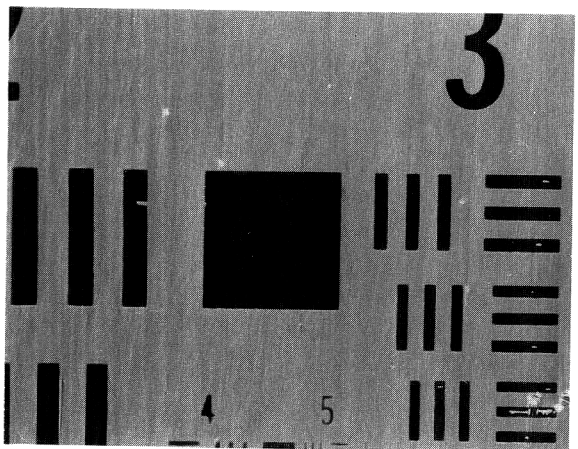
に平行な偏光を入射させた場合(オフ状態)、配向秩序が低ければ、乱れた液晶配向の複屈折により光が漏洩する。そのため、測定されたオフレベルは、膜厚依存性が少なく、主に配向状態を反映する。



(a) Rubbing Alignment

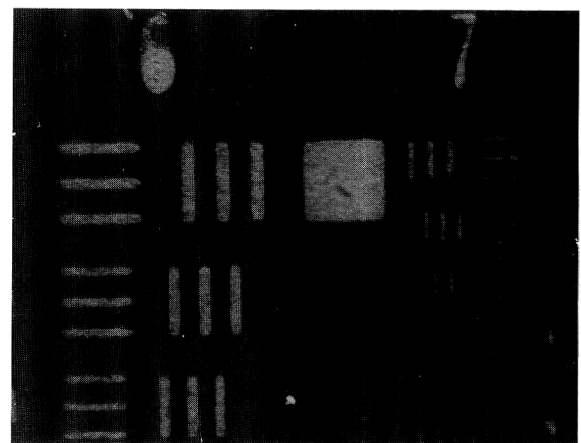


(a) Positive Image



(b) Optical Alignment 200 μ m

Fig. 11. Microscope photographs of the SSFLC cells driven by an appropriate applied voltage.



(b) Negative Image 30 μ m

Fig. 12. Microscope photographs of small slit images of the SSFLC cell driven with the patterned ITO electrode.

Fig. 9 は、偏光紫外光 (2 mW/cm^2) の照射時間を変えて、オフレベルの測定をした結果である。適度な照射量 (照射エネルギー約 1 J/cm^2) でオフレベルが最小化し、良好な配向性が得られている。そのレベルは、従来のラビング処理に匹敵する。過度の照射量¹³⁾ で液晶の配向が乱れるのは、Fig. 5(d) に示したように、配向に寄与するポリイミド主鎖さえも、熱運動でゆらいでいる間に光分解されていくためと考えられる。

試作した SSFLC セルの配向状態を、偏光顕微鏡で観察した結果が Fig. 10 であり、照射量の最適化により配向の均一化が確認できる。短波長のエキシマランプの採用により、少ない照射量で良好な配向が得られた。

なお、SSFLC の配向は、紫外光の照射量のみならず、ポリイミドの焼成温度、すなわちポリイミド主鎖の凝集状態にも関わることが実験的に判明している。180 $^{\circ}\text{C}$ より低温の 100 $^{\circ}\text{C}$ で焼成した軟らかいポリイミド膜では、少ない照

射量でオフレベルの最小ピークが得られるが、その場合のオフレベルは比較的高く、配向秩序性が劣化することが確認されている。

5. 空間的な動作特性

5.1 均一性

SSFLC の空間動作特性を評価するため、ITO 電極を解像度チャートパターン (USAF-1951) でエッチングして液晶セルを駆動した。これにより、SSFLC を空間的に変調することが可能になる。

Fig. 11 は、ラビングおよび光配向処理の SSFLC セルを用いて、微小画像を表示した結果である。ラビング処理では、配向欠陥の境界部からスイッチングドメインが不規則に発生し、表示画像が著しく乱されている。それに対して光配向を用いることにより、空間的な変調ノイズが大幅に軽減され、表示画像が大きく改善されている。

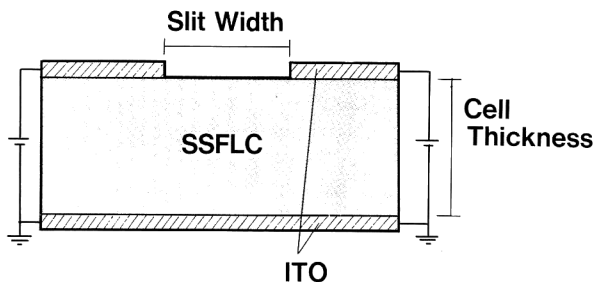


Fig. 13. Simulation model of a SSFLC cell using a slit-patterned electrode for evaluating inner electric field.

このような表示画像の差異を定量的に評価するため、数十 μm 径に絞ったビーム光 (He-Ne レーザー、波長 633 nm) を SSFLC セルに入射し、その照射位置を変えながら、電気光学特性を測定した。その結果、SSFLC の閾値電圧のばらつきは、ラビング配向処理で 21% に達したのに対して、光配向処理では 7% 以下に留まった。ラビング処理での不均一な配向効果は、シェブロン構造による配向欠陥の形成とともに、面内での閾値電圧のばらつきを助長し、著しい画質低下をまねくことが確認された。

なお、Fig. 11 の観察実験では、スイッチングドメインが隣接領域に伝搬・拡大する現象がみられた。ドメイン隣接部の閾値電圧が低下する強誘電性液晶の隣接効果¹⁵⁾は、微細駆動時には不都合である。それを防ぐには、液晶分子の相互作用すなわち弾性効果を低減させるか、液晶のバルクとしてのスイッチング挙動を、微小なポリマーネットワーク¹⁶⁾により分断するなどの方策が必要となろう。

5.2 限界解像度

液晶を用いて光を微細に変調する場合、微小電極による電界で確実に駆動できるように、SSFLC の閾値電圧が面内で均一でなければならない。

そこで、空間動作が均一化された SSFLC の表示能力を把握するため、前述の ITO パターンで SSFLC を駆動し、限界解像度を測定した。この場合、エッチングで形成した ITO パターンの最小スリット幅は、 $1.25 \mu\text{m}$ である。Fig. 12 の顕微鏡観察で示されるように、ITO パターンの最小ストライプによる液晶の光変調像が確認されたことから、光配向を用いた SSFLC の限界解像度は、少なくとも 400 line pairs (lp)/mm 以上であることが初めて判明した。

なお、同図の微小な光変調像は、4 V の矩形波駆動により得られた。このとき、ITO 電極下の内部電界が液晶の閾値電界以上となり、その一方、ITO がいないスリット部の電界が閾値以下に設定されたと考えられる。ここで交流波形を用いたのは、直流電圧を連続印加したとき、解像度が劣化したためである。書き込み画像が擾乱されたのは、長時

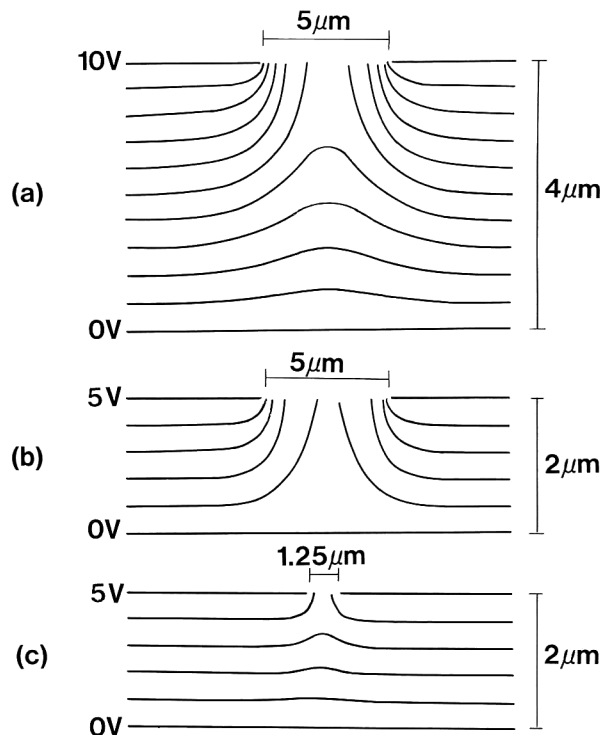


Fig. 14. Electric field pattern in the SSFLC cells driven with the patterned electrodes.

間の直流駆動が、液晶内イオンの移動やその配向膜吸着に伴う分極効果¹⁷⁾を助長し、内部電界を実効的に変化させたためと考えられる。したがって、高解像度駆動の条件として、消去用のリフレッシュ電圧パルスの間欠の印加が重要である。

また、電圧除去時のメモリー像の空間的安定性は、電圧印加時に比べて著しく低下することが確認された。これには、前述した液晶の弾性に基づく隣接効果やイオン移動に伴う分極効果が大きく関わっていると思われる。

6. 液晶セル内の電界解析

6.1 有限要素法

このような液晶の解像度特性は、液晶セル内の電界パターンに大きく依存すると考えられる。そこで、ポアソン方程式に基づく有限要素法¹⁸⁾を用いて、内部電界のシミュレーションを行った。

その解析モデルとしては Fig. 13 に示すように、解像度測定時と同様、片側の ITO 電極に微小なスリットを付けた構造を想定する。ここで、幅 $15 \mu\text{m}$ 、厚み $2 \sim 4 \mu\text{m}$ の SSFLC 切断面を、それぞれ 60 および $20 \sim 40$ 分割し、さらに対角線で $1/2$ にして三角要素を定義する。すなわち、計算に用いられる節点の間隔は、幅方向で $0.25 \mu\text{m}$ 、厚み方向で $0.1 \mu\text{m}$ となる。なお、本解析では、液晶の再配向に伴う

誘電率変化を考慮していない。

6.2 内部電界

Fig. 14(a), (b) は、セル厚が $4\ \mu\text{m}$ と $2\ \mu\text{m}$ の SSFLC セルに、一定の電界が生じるように電圧（セル厚 $1\ \mu\text{m}$ につき $2.5\ \text{V}$ 印加）を加えた場合の電位分布である。この場合のスリット幅は $5\ \mu\text{m}$ であり、 $100\ \text{lp/mm}$ の解像度に相当する。スリット電極による液晶内部の電位変化は、セルが薄いほど大きく、めりはりある電界が液晶層に印加されることになる。この点を考慮すれば、現在普及しているツイステッドネマティック液晶セル（セル厚 $6\ \mu\text{m}$ 程度）に比べて薄い SSFLC セル（ $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 厚）は、微細駆動に適している。

さらに、Fig. 14(c) は、ITO のスリット幅を $1.25\ \mu\text{m}$ ($400\ \text{lp/mm}$ 相当) に減少させた場合である。Fig. 14(b), (c) の比較から、セル厚を変えずにスリット幅を細くしたとき、電位変化がセル深部にまで浸透しなくなり、光変調像を生み出す電界の差異は、きわめて微小なものとなることがわかる。

このような場合、SSFLC の急峻な閾値特性が生かされる。すなわち、液晶の変調に必要な電圧差が、スリットによる電圧分布よりも小さければ、スリット像が解像されることになる。しかし、閾値電圧が素子面内でばらつき、スリットによる電圧分布と閾値電圧のばらつき幅が同等になったとき、必ずしも光変調像が得られるとは限らない。したがって、液晶を高解像度に駆動するには、セル厚の低減、閾値特性の急峻化とともに、閾値電圧の均一化が求められることになる。

7. むすび

短波長紫外光を用いた光配向処理により、均一なアンカリング効果を実現し、SSFLC セルを試作した。その結果、微小欠陥が解消するとともに、面内で閾値電圧が均一化し、表示画像のノイズが大幅に改善された。その限界解像度は、 $400\ \text{lp/mm}$ 以上に達した。さらに有限要素法による電界解析から、液晶の微細駆動には、薄いセル厚、急峻な閾値特性、閾値電圧の均一化が不可欠であることを明らかにした。

今後、本方式の SSFLC を用いて高解像度な空間光変調素子を試作し、動画ホログラムなどに応用を図っていく予定である。

文 献

- 1) S. Fukushima and T. Kurokawa: "Real-time hologram construction and reconstruction using a high-resolution

spatial light modulator," *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 787-789.

- 2) G. Moddel, K. M. Johnson, R. A. Rice, L. A. Pagano-Stauffer and M. A. Handchy: "High-speed binary optically addressed spatial light modulator," *Appl. Phys. Lett.*, **55** (1989) 537-539.
- 3) S. Fukushima, T. Kurokawa, S. Matsuo and H. Kozawaguchi: "Bistable spatial light modulator using a ferroelectric liquid crystal," *Opt. Lett.*, **15** (1990) 285-287.
- 4) R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki and P. Keller: "Ferroelectric liquid crystals," *J. Phys.*, **36** (1975) L69-L71.
- 5) N. A. Clark and S. T. Lagerwall: "Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals," *Appl. Phys. Lett.*, **36** (1980) 899-901.
- 6) Y. Ouchi, J. Lee, H. Takezoe, A. Fukuda, K. Kondo, T. Kitamura and A. Mukoh: "Smectic C* chevron layer structure studied by X-ray diffraction," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L725-L728.
- 7) Y. Hanyu, K. Nakamura, Y. Hotta, S. Yoshihara and J. Kanbe: "Molecular alignment of a very-large-size FLC," *Society for Information Display Dig.*, 24.2 (1993) pp. 364-367.
- 8) H. Furue, Y. Iimura, Y. Miyamoto, H. Endoh, H. Fukuro and S. Kobayashi: "Fabrication of a zigzag defect-free surface-stabilized liquid crystal display using polyimide orientation film," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 3417-3421.
- 9) 舟守 淳, 藤掛英夫, 會田田人, 菊池 宏, 藤井孝憲, 河北真宏, 滝沢國治, 岸 清: "紫外線配向を用いた表面安定化強誘電性液晶の微小画像表示特性", 第 58 回秋季応用物理学会講演会, 4a-ZP-7 (1997) p. 1197.
- 10) 藤掛英夫, 舟守 淳, 會田田人, 菊池 宏, 藤井孝憲, 河北真宏, 滝沢國治, 岸 清: "表面安定化強誘電性液晶の微小画像表示特性", 電子情報通信学会技術研究報告, **EID98-4** (1998) 17-22.
- 11) 若生一広, 韓 官榮, 内田龍男: "ラビングした高分子配向膜におけるマイクログループの形成と表面配向力", 第 21 回液晶討論会, 1A16 (1995) pp. 12-13.
- 12) K. Wako, K. Y. Han, T. Oshima, T. Miyashita and T. Uchida: "Alignment model of the liquid crystal on the rubbed polymer surface and evaluation of its anchoring strength," *Proc. International Display Workshops*, LCT2-1 (1997) pp. 45-48.
- 13) M. Hasegawa and Y. Taira: "Nematic homogeneous alignment by photo depolymerization of polyimide," *Proc. International Display Research Conference* (1994) pp. 213-216.
- 14) S. Kataoka, Y. Taguchi, Y. Iimura and S. Kobayashi: "Liquid crystalline polymer stabilized FLCs with conventional rubbed polyimide films or with photo alignment films of poly (vinylcinnamate)," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **292** (1997) 333-343.
- 15) R. E. Brooks, N. A. Clark, M. A. Handschy and T. P. Rieker: "Proximity effect for scrolling spatial light modulator applications of surface-stabilized ferroelectric liquid-crystal switching," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 1646-1648.
- 16) H. Fujikake, K. Takizawa, H. Kikuchi, T. Fujii, M. Kawakita and T. Aida: "Polymer-stabilized ferroelectric liquid crystal devices with grayscale memory," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 6449-6454.
- 17) 張 百英, 吉田正明, 関根裕之, 小林駿介: "電荷移動錯体添加 FLC の特性", 電子情報通信学会技術研究報告, **EID89-41** (1989) 1-6.
- 18) 加川幸雄, 村山健一: BASIC による電気・電子有限要素法 (科学技術出版社, 1986) p. 18.